

氏 名	井 町 智 彦
生 年 月 日	
本 籍	山口県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博甲第511号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	衛星搭載用電界観測アンテナの特性解析
論文審査委員(主査)	長野 勇(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	村本健一郎(工学部・教授) 橋本 秀雄(工学部・教授) 八木谷 聡(自然科学研究科・助教授) 岡田 敏美(富山県立大学工学部・教授)

## 学 位 論 文 要 旨

### ABSTRACT

Observation of plasma waves in the space is an important subject of scientific spacecraft missions. Especially, measuring the low frequency waves, lower than a few MHz, is very important to study space plasma environment. It is necessary to estimate the effective length of each electromagnetic wave sensor. However, the estimation is not easy, because the antennas have complicated structure and are surrounded by plasma, and the structure of the antenna is not simple.

The purpose of this paper is to estimate the effective lengths of wire antennas aboard GEOTAIL spacecraft. GEOTAIL has two pairs of wire antenna, and the length of each of them are 100 m tip-to-tip. In order to estimate the effective length, we adopt two approaches; 1) calculation using the wave form data of electromagnetic waves observed by GEOTAIL and 2) rheometry experiment using a small antenna installed in a water tank.

In the former method, we use the chorus emissions which are whistler mode electromagnetic waves. we calculate the theoretical electric field intensities from the observed magnetic field intensities assuming the cold plasma dispersion, and estimate the effective length by comparing those with the observed electric field intensities.

In the latter method, we generate a quasi static electric field in the water tank. The intensity of the generated electric field is exactly known so that we can estimate the effective length of a small "scale-model" wire antenna in the water from its output voltage.

## 1 序論

近年, 科学的観測を目的とした人工衛星が数多く打ち上げられている. 1990年代初めには, アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and space Administration : NASA), ヨー

ロップ宇宙機関 (European Space Agency : ESA), ロシア宇宙科学研究所 (IKI), 日本の文部科学省宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science: ISAS) による ISTP (International Solar - Terrestrial Physics) 計画が立ち上げられ, あけぼの (EXOS-D) や GEOTAIL など数多くの科学衛星による地球周辺宇宙環境の観測が, 大規模に行われた。また, 1998 年には日本初の火星探査衛星「のぞみ」が打ち上げられ, それに先立ち 1997 年の Mars Pathfinder (NASA) の火星表面へのローバー着陸, 同年の Mars Global Servayer (NASA) の火星軌道投入などが相次いで成功し, 火星における衛星観測も活気付いている。宇宙空間における電磁波動の観測は, ISTP の衛星群や「のぞみ」の観測目的の一つである。宇宙空間は何も無い空間と考えられがちだが, 実際には希薄なプラズマ媒質で満たされた空間であり, そこで発生・伝搬する電磁波動はプラズマ波動と呼ばれ, 空気中や真空中とは異なった特性を示し, これを解析することで地球や惑星の磁気圏構造のリモートセンシングの様なマクロなものから, 電磁波動とプラズマ粒子の相互作用の解明の様なミクロなものまで, 様々な物理現象の解明に貢献することができる。

電磁界観測において, ほとんどの衛星が磁界センサとしてサーチコイルかループアンテナを, 電界センサとしてワイヤアンテナを使用している。電界の大きさを正確に知るためには, センサの特性が正確に分かっていなければならないが, 磁界センサについては打ち上げ前の計測によって, その特性を知る事ができる。しかし, 衛星のワイヤアンテナの場合それを知るのは容易ではない。まず, 観測対象である自然電波は強度が弱く, 特に比較的低周波数の低いものを観測しようとする, アンテナは非常に長大なものになる。過去に打ち上げられた衛星では, あけぼのが全長 60 m, GEOTAIL が 100 m, のぞみが 50 m のワイヤアンテナを搭載している。また, 観測を行うのはプラズマ媒質中であり, 地球の大気中とはアンテナの特性が異なってくる。これらの要素により, まず打ち上げ前の測定が非常に困難であり, またワイヤアンテナの出力電圧は実効長に依存するため, 校正用信号源による打ち上げ後の校正にも限界がある。特に推定が難しいのは実効長であり, これを推定することを目的とした研究はこれまでも数多くなされている。本研究は, GEOTAIL 衛星の実効長に対し, 1) 衛星による観測データからの推定, 2) 模型を用いた研究室での実験という2つのアプローチにより特性の解明を目的とするものである。

## 2 GEOTAILのプラズマ波動観測装置

GEOTAIL 衛星には様々な観測器が搭載されているが, 本研究に主に関係するのはプラズマ波動観測装置 (PWI) [1] である。PWI はプラズマ中での電磁波の観測が目的であり,

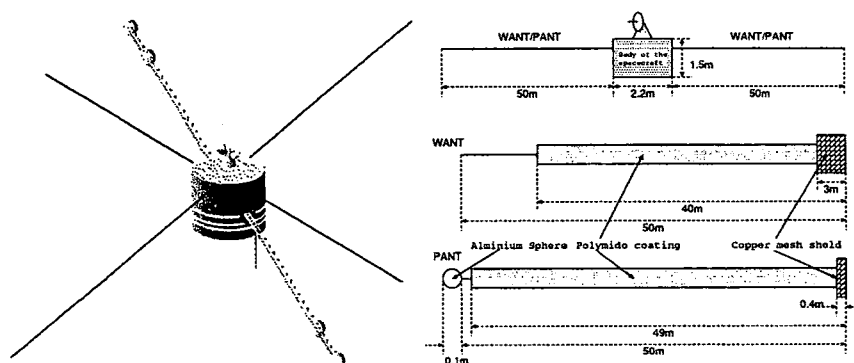


図 1 GEOTAIL 衛星の電界センサ

電磁界センサとして WANT (Wire Antenna), PANT (Probe Antenna) と呼ばれる 2 組の電界アンテナと 3 軸サーチコイルを用い、サブシステムとして 電界 5 周波数バンド、磁界 3 周波数バンドを持つスーパーヘテロダイン方式のスイープ式スペクトル・アナライザからなる SFA (Sweep Frequency Analyzer), 34 チャンネルのフィルタバンク型受信器からなる MCA (Multi Channel Analyzer), 電界 2 方向成分、磁界 3 方向成分の波形を同時観測できる WFC (Waveform Capture) の 3 つがある

GEOTAIL には電界センサとして WANT(Wire Antenna), PANT(Probe Antenna) と呼ばれる 2 組のワイヤアンテナが取り付けられている。これらは PWI と EFD(Electric Field Experiment:電界観測班) との共用のセンサであり, WANT, PANT とともに片側 50m, 全長 100m である。これらは衛星スピン軸に垂直な平面内に直交して配置されており, 衛星のスピンによる遠心力から張力を得ている。図 1 に GEOTAIL 衛星の外観および, WANT, PANT の構造を示す。

### 3 Chorus Emissions を用いた実効長の評価

GEOTAIL 衛星に搭載されているプラズマ波動観測装置 (PWI) の波形捕捉受信器 (WFC) の観測周波数帯域で観測される波動に, コーラスエミッションと呼ばれる電磁波がある。これは, 地球磁気圏の昼側において数百 ~ 数 kHz の周波数帯域で観測される自然波動であり, 短時間に周波数が大きく変動する特徴的なスペクトル構造を持っている。コーラスエミッションの性質はこれまでよく研究されており, 円偏波を持つ単一平面波の電磁波 (ホイストラモード波) であることが分かっている。周辺のノイズレベルに対して 20 ~ 40 dB 強く観測されることが多いため S/N 比がよく,  $k$  ベクトルの方向をかなり正確に特定することができるため, 固有値解析により各時刻の各周波数成分に含まれる  $k$  ベクトルの数を求めることで, コーラスエミッションと他の電磁界を確度よく分離することができる。本節においては, WFC を用いて観測されたコーラスエミッションの波形データを使用して実効長の推定を試みる [2]。

WFC では, 2 組の電界アンテナによる電界 2 成分, 3 軸サーチコイルによる磁界 3 成分の波形が同時観測される。まずは, これらの観測波形に対し較正を行うのだが, ここでは単純にアンテナを微小ダイポール近似して, 仮の実効長  $h_{asm}$  を全長の半分である 50 m であると仮定した。この  $h_{asm}$  を用いてアンテナの端子出力電圧を電界の次元に変換し, それにプラズマシースによるインピーダンスへの影響や, プリアンプまでのアンテナ基部回路の伝達関数を考慮して, アンテナに印加されている電界の大きさを計算する。この様にして求めた電界の大きさを  $E_{ob}$  とする。

次に, 観測された磁界の波形から電界の波形を理論的に計算することを考える。Maxwell の方程式より,

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \mathbf{E} &= -\frac{1}{\omega \varepsilon_0} \tilde{\kappa}^{-1} (\mathbf{k} \times \mathbf{H}) \\ \mathbf{E} &= -cn \tilde{\kappa}^{-1} (\mathbf{u}_k \times \mathbf{H})\end{aligned}\quad (1)$$

となる。ここで  $\mathbf{E}$  は波動の電界強度 [V/m],  $\mathbf{B}$  は波動の磁束密度 [T],  $c$  は光速 [m/sec],  $n$  はその屈折率,  $\tilde{\kappa}$  は衛星周辺におけるプラズマの比誘電率テンソル,  $\mathbf{u}_k$  は, 波動の  $k$  ベクトル方向の単位ベクトルである。

コーラスエミッションはホイスラモード波であり、円偏波を持つ単一平面波であるので、その  $k$  ベクトルの方向は磁界の偏波面に常に垂直方向を向く。従って、以下の方法で  $u_k$  を計算することができる。解析信号法 (ASM) を使用し  $B$  にヒルベルト変換を施す。この時  $B$  の複素共役  $B^*$  は周波数によらず  $B$  と位相が  $\pi/2$  異なるため、両者の外積を取ることで偏波面の法線ベクトルが算出できる。また、GEOTAIL の他の観測器のデータより、衛星周辺の地球磁場の強度や方向、電子密度がそれぞれ得られる。電子プラズマ周波数  $f_p$  は電子密度より、地球磁場の強度からは電子サイクロトロン周波数  $f_H$  が求まるので、コールドプラズマの分散関係式より、屈折率  $n$  を求める事ができる。

これらの値を式 (1) に代入することで、アンテナによる電界の観測値を使用することなく波動の電界の大きさを理論的に計算する事ができる。この様にして求めた電界の理論値を  $E_{th}$  とする。 $E_{th}$  は電界アンテナで観測した値を使わずに求めているので、実効長の大きさに影響される事無く求められる値である。

ここで、アンテナの出力電圧を  $V_o$  とすると、 $E$  を電界強度のアンテナに平行な方向の成分としたとき  $V_o = E \cdot h_{eff}$  であるから、実際の実効長  $h_{act}$  と仮定した実効長  $h_{asm}$  の関係は、以下の様に示す事ができる。

$$V_o = E_{ob} \cdot h_{asm} = E_{th} \cdot h_{act} \quad (2)$$

$$\therefore h_{act} = \alpha \cdot h_{asm}, \quad \alpha = \frac{E_{ob}}{E_{th}} \quad (3)$$

すなわち、 $E_{th}$  は実効長の大きさに影響されない電界の真値とみなす事ができ、 $E_{ob}$  はアンテナの実効長を  $h_{asm} = 50$  m と仮定した時の値であるので、式 (3) において  $|\alpha| = 1$  となれば、実効長は仮定通り 50 m であることになる。

以上の方法を用いて 1993 年 8 月 25 日 19 時 43 分 28 秒 (UT) から 8.7 秒間に 300 ~ 600 Hz の周波数帯において観測されたコーラスエミッションに対する解析を行なった結果を図 2 に示す。図 2 の縦軸は  $|\alpha|$ 、横軸は時間で、推定実効長の時間変化を表している。図中に縦方向に引かれている実線と破線は、それぞれ WANT と PANT が太陽に向いた時刻を示している。推定実効長には時間とともに変動が見られるが、これは衛星のスピンの同期していることから、光電効果の影響である可能性が高い。全体の平均値を取ると、2 組のアンテナのそれぞれの実効長は 46.5 m, 51.0 m と求まり、互いにほぼ等しく全長の半分程度であるとの結果が得られた。

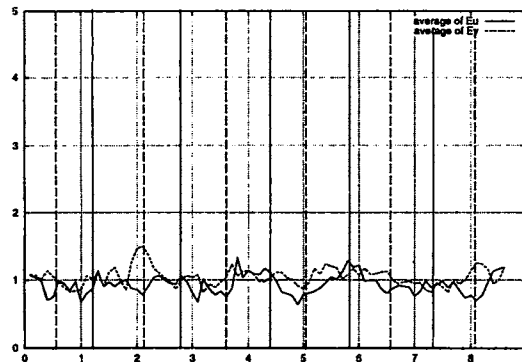


図 2 実効長解析結果。縦軸が  $|\alpha|$ 、横軸が時間 [秒] を示す。

## 4 レオメトリ実験

レオメトリ実験は、ヨーロッパの土星探査衛星カッシーニのソリッドアンテナ等についてヨーロッパで数例実施例があるが [3], 国内においてはおそらく例がないと思われる。実験のアイデア自体は非常に明快で、アンテナの模型を作成して人工的な既知の電界中に配置し、出力電圧を測定するというものである。電界を発生させるには、距離をおいて電極を配置し交流電圧をかければよい。このとき発生するのは電磁波ではなく振動する準静電界であるが、アンテナで受信する電磁波を単一平面波に仮定すれば、この手法でアンテナ特性の評価が可能である。しかしながら、空気中のような自由空間的な環境では電気力線が拡散するため、観測可能な電界を生成することはできず、またワイヤアンテナの要素間のインピーダンスは  $R // C$  で表されるが、空気中においては  $R \approx \infty$  であり、 $C$  は数 pF 程度であることから低周波においてインピーダンスは非常に大きくなり、要素間に測定器を繋いだ場合、アンテナインピーダンスは観測器の入力インピーダンスと比べ大変大きな値となる。これらのことから、空気中にワイヤアンテナで測定可能な準静電界を発生させることは、不可能であると言える。

そこで平板電極を水中に平行に配置し、電極板に交流信号を印加することにより、水中に準静電界を発生させる。水中においては、媒質の比誘電率が 80 程度と非常に大きくなるため、一様な電界を発生させることができる。また、使用する水は完全な純水ではないため導電率をもち、そのためアンテナの要素間のインピーダンスを測定器の入力インピーダンスよりも低くすることができる。

本節では、このレオメトリ実験により、10 Hz ~ 100 kHz の周波数帯における実効長の周波数依存性について調べた。電界を発生させる装置として、プラスチック製の直方体 (内寸 ; 530mm × 367 mm × 220 mm) の水槽と、ステンレス板 ( 350 mm × 200 mm, 厚さ 1mm ) 2 枚を使用した (図 3)。また、水中に配置する受信アンテナとして全長 0.3 m のワイヤアンテナを、以下の 3 種類作成した。

1. 切断した被覆銅線をそのまま使用したもの (Config. 1)
2. 1 の断面を絶縁被覆したもの (Config. 2)
3. 1 の両端に、直径 17 mm のアルミ球を取り付けたもの (Config. 3)

実験の結果、実効長の周波数依存性は状態 1 ~ 3 のそれぞれによって大きく異なる特性を示した (図 3 (右))。状態 1 の場合、実効長は低周波においてほぼアンテナ全長、周波数が高くなると、全長のほぼ半分に収束した。状態 2 の場合、低周波においての実効長の大きさが状態 1 とは全く異なり、非常に小さい値を示した。この場合も、周波数が高くなる

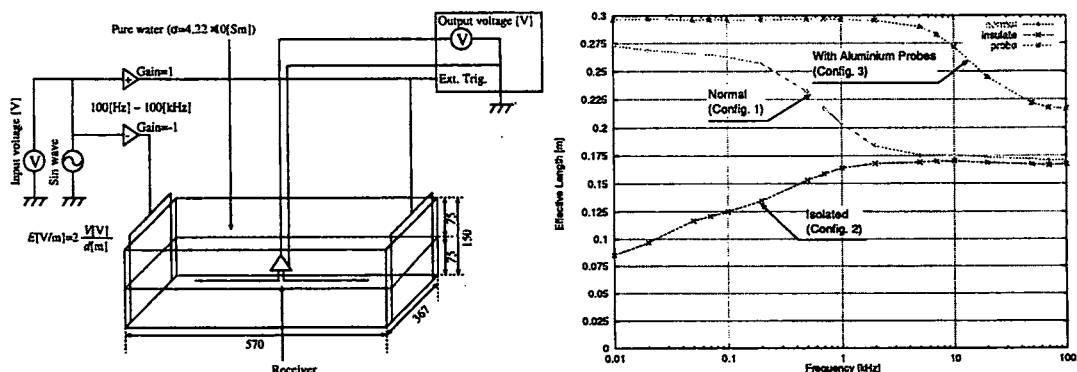


図 3 実験装置概要 (左) と実験結果 (右)

と全長のほぼ半分に収束している。状態3の場合は、低周波においてほぼアンテナ全長であるが、周波数が高くなってもその値を維持するという特性を示した。最終的にはより低い値へ遷移するが、状態1, 2に比べ全体に大きい特性となった。この結果は低周波においてはアンテナ両端が静電ポテンシャルを拾う傾向が強く、周波数が上るにつれて電流分布に勾配が出来始め、微小ダイポール近似での実効長に近付いて行くという特性を示しているものと考えられる。

## 5 総括

本論文における結果をまとめる。

本論文の目的は、科学衛星におけるプラズマ波動観測において重要なパラメータである、電界観測アンテナの実効長を推定することであった。実際の科学衛星として GEOTAIL 衛星に着目し、その電界観測用ワイヤアンテナの実効長の推定に、観測データからの計算と、研究室における実験の2つのアプローチを試みた。

第2章においては、研究の対象である GEOTAIL 衛星のプラズマ波動観測装置 (PWI) の電界アンテナについて述べた。

第3章においては、PWI で観測された自然波動、コーラスエミッションを用いて実効長の推定を行った。その結果、GEOTAIL 衛星に搭載されている2組みのワイヤアンテナのそれぞれに対して、独立に実効長を推定することができた。その結果、それぞれの実効長に大きさの差はほとんど無く、そのどちらも全長の半分にほぼ等しいことが確認された。

第4章においては、レオメトリ実験により、低周波におけるワイヤアンテナの実効長の周波数依存性について調べた。その結果、低周波においては静電ポテンシャルの寄与が大きく、周波数が上がるにつれて電流分布形状の寄与が大きくなっていく傾向が観察された。

以上の結果より、PWI によるプラズマ波動観測においては、2組の電界観測アンテナの実効長をそれぞれ全長の半分として扱っても特に大きな測定誤差は生じないであろうことが確認された。また、PWI は静電界の観測を目的としている EFD 班とアンテナを共用しているが、EFD においては電界観測アンテナの実効長は全長に等しいとしている。すなわち静電界に近い極々低周波の領域においては実効長は全長に等しく、周波数が上がると全長の半分になるとして扱われていたが、本論文において行われた実験により、その遷移の様子が確認された。

最後に、今後の課題について述べる。

コーラスエミッションを用いた実効長の推定についてであるが、この手法ではコーラスエミッションが発生している周波数においてしか実効長の推定が行えない。したがって、もっと観測データを増やすことで、周波数依存性の有無を確認する必要がある。

レオメトリ実験については、現状では全長 30 cm という短いワイヤを使用しているため、微小な誤差が結果に反映されやすい。このため実験装置の拡大を図り、誤差を軽減することが望まれる。また、アンテナの形状、被覆の違いによって特性がどう変化していくかについても詳しく調べる必要がある。あるいはアンテナとともに衛星構体の模型を配置し、その影響についても調べていきたい。また、この実験における水中という測定環境は、周辺の媒質が静電容量とともに導電率を持つ点ではプラズマ環境と共通しているが、荷電粒子の振舞、シースの有無など、相違点は多々ある。よって、この実験を実際のプラズマ環境に当てはめる際に、どのような環境を模している事になっているのかについて、モデル

の検討が必要である。

また、プラズマ環境も考慮した実効長の推定を正確に行うためには、コンピュータシミュレーションによるアンテナ上の電流分布の考察等が必要になるものと思われる。今後は、観測、実験、シミュレーションの3つのアプローチを組み合わせることで、より精度の高いアンテナ理論の構築を目指して行きたい。

## 6 参考文献

- [1] 松本 紘, 木村磐根, 長野 勇, R. R. Anderson, 橋本弘蔵, 筒井 稔, 岡田敏美, 大村善治, 小嶋浩嗣, “科学衛星 GEOTAIL 搭載プラズマ波動受信器”, 信学技報, AP93, pp.1-7, 1993
- [2] 井町智彦, 八木谷聡, 長野 勇, 筒井 稔, 松本 紘, “GEOTAIL 衛星搭載電界観測アンテナの実効長の評価”, 信学論 (B), vol.J85-B, no.1, pp.97-104, 2002
- [3] H. O. Rucker, W. Macher, R. Manning, H. P. Ladreiter, Cassini model rheometry, Radio Science, vol.31, no.6, pp.1299-1311, 1996

## 学位論文審査結果の要旨

平成 14 年 1 月 28 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催, 2 月 1 日に口頭発表, その後に第 2 回審査委員会を開催し, 慎重審議の結果以下の通り判定した。なお, 口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

宇宙空間におけるプラズマ波動の観測は, 数ある観測項目の中で, 宇宙の構造や各種現象を研究するのに非常に重要な項目である。殆どの科学衛星はプラズマ波動の電界を測定するセンサとしてワイヤアンテナを搭載している。電界の絶対値を測定するためには, プラズマ中のアンテナインピーダンスや実効長を知る必要がある。本論文では, GEOTAIL 衛星に搭載されたワイヤアンテナの実効長について, 次の 2 つの方法で解析した。

- 1) 実際の波動観測データからの推定
- 2) 模型を用いた水槽実験からの推定

前者においては, 実際に GEOTAIL 衛星で観測された自然波動の磁界成分 (コーラス) と Maxwell 方程式から推定される電界の大きさとワイヤアンテナで実測された電界とを比較する手法によって, 直交アンテナの実効長を個別に推定した。後者においては, 水中に発生させた準静電界中に小型アンテナを配置しその誘起電圧を直接観測する「レオメトリ実験」により, ワイヤアンテナ実効長を測定した。前者により, 初めて衛星における直交アンテナの実効長を推定し, 電界の絶対値観測を可能にした。また, 後者では, 実効長が周波数の関数であることを実験で明らかにした。

以上の内容から, 本論文は博士 (工学) に値するものと判定した。